



周辺埋土を考慮した地盤-建物の動的相互作用ばね の精算解とその展開

著者	角田 智彦
号	1468
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/10275

氏 名	つ角 だ田 とも智 ひこ彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 6 年 2 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 32 年 3 月 熊本大学工学部建築学科卒業
学 位 論 文 題 目	周辺埋土を考慮した地盤—建物の動的相互作用ばねの 精算解とその展開
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広

論 文 内 容 要 旨

地震の多発する我が国では、耐震設計の発達はもとより、その基本計画・設計の段階からさまざまな工夫がなされてきた。それは、古くは寺社の五重の塔から現代の超高層ビルに至る迄、歴史的な流れの中に見ることができる。この観点から、建物への地震動入力の高減をはかることは耐震設計の1つの大きな柱である。礎石上にピン構造で立柱式に建立された古代の社から、今日の免震システムに至る発達などがその範疇に入るであろう。観点を地震挙動に変えて見ると、地盤における地震動そのものの挙動は、地表面がもっとも大きく、地中深くになればその値が確実に減少していることは、数多くの観測データから実証されている。現在の建設技術水準で考えると、耐震的安全性を重視して建物を深く埋込む（地下室部分を深くする）ことは有用な手段の一つであると考えられる。

一方、地盤と建物の作用地震力の関係（動的相互作用問題）は、建物が地震動による揺れを受けた後の挙動に関わりを持ち、振動エネルギーの地下逸散減衰問題として取り扱われる。

本研究の目的は、地盤と建物の動的相互作用問題のうち、動的地盤ばね（動的インピーダンス）について研究した成果をまとめたものである。今日、地表面に設置された建物の動的地盤ばねに関する研究成果はすでに確立され、耐震設計等で実用段階に入っている。しかし、より深く埋込まれた建物の動的地盤ばねの考え方については、その設置される地盤条件、埋込まれる基礎側面の施工条件等から、さまざまな提案がなされているのが現状である。そこで、本研究では、より現実に適した解析手法を調査・選択し、実験結果等と対比しながら精算解の定式化を行った。更に、耐震設計への実用化の方向を検討した。なお本論文では、地盤の弾性範囲に限定して動的地盤ばねの研究

を進めた。

本論文は全6章で構成されており、各章の要旨を以下にまとめた。

第1章 序 論

本研究の主題である埋込まれた建物のおかれている歴史的背景や研究目的を述べると共に、テーマを絞り込んで行くためのいくつかの問題点を指摘しながら、本研究作業の展開についても概略述べた。

第2章 既往の研究

2章は、大きく分けて、既往の研究を歴史的に調査・分類し、ツリー構造的にまとめた部分と、筆者が本論文のテーマに関連して過去に直接、間接に携わってきた研究について紹介した部分に分かれる。

既往の研究の概略：既述のように、建物がより深く埋込まれるようになったのは比較的近年になってからのことである。更にそれを耐震設計に取り組むことを検討し始めたのは1970年代後半になってからである。しかし、一般的な地盤—建物の動的相互作用問題の研究は、その発端を1904年のH.Lambの研究に求めることができる。その後、理論的研究の分野では3次元波動論から求めた動的地盤ばねが1つの大きな柱となり、更に、近年の電子計算機の発達ともあいまって、2, 3次元FEM, 境界要素法, それらを組み合わせたハイブリッド法等が実用化されている。そしてそれ等は複雑な基礎形状や、単なる埋込み問題にとどまらず、不整形な地形への埋込み問題の解決を可能にしつつある。一方、耐震設計の立場にたって問題の解決を考えると、簡易解法の必要性も生じ、そのために、いくつかの提案がなされている。実験的研究として著名なのは、Novakらの一連の研究で、その成果は、埋込まれた基礎の周辺地盤部分を動的ばねとして評価する簡易解法として、今日活用されている。更に、埋込まれた建物および試験体の動的実験・地震観測等は、上記の解析的研究に呼応して、1970年代後半から盛んになり、今日に至っている。

関連研究のまとめ：筆者が現在までに手がけてきた埋込まれた建物の耐震設計上の検討に関する研究のうち、公的機関に発表した論文の紹介を行っているが、それらの実験および解析的研究を通じて得られた知見として、解析的検討に際し特に硬質地盤においては基礎直下の支持地盤にゆるみ層を考慮する必要のあること、周辺埋土の剛性の評価に関しては上載圧の影響を考慮する必要があることを述べた。

これらをまとめて、3章以降では境界要素法を中心に研究を展開することが適当だとの判断をした。

第3章 埋込まれた建物の地盤動的相互作用ばねの精算解

3章の前半は、埋込まれた建物の地盤動的相互作用ばねを境界要素法を用いて解析するための定式化を行った。その際に、前章で述べた、支持地盤のゆるみ層、周辺埋土の解析・評価が必要であり、また、地盤の減衰定数を取り込むことを考慮に入れて複素数解析が可能な様にした。また、

解析条件の設定に際しては、先ず基本的な半無限一様弾性地盤上に設置された建物の動的相互作用ばねを求め、本解析手法の妥当性を確認した。次に、基礎周辺境界を現実に近い解析モデルに設定した際の境界要素数、解析精度等をあらかじめ検討できるようにした。この様にして現実の成層性をもった地盤への適用も可能とした。

以下、境界要素法による、埋込まれた建物の動的地盤ばねの精算解の結果を、実験結果と対比した結果について述べる。実験結果から得られた動的地盤ばねとの直接的な比較・検討に関しては、半無限一様弾性地盤中に埋込まれた建物に限定し、基礎底面・側面の集約した水平、回転、水平・回転連成ばねについての振動数特性を対象とした。

- 1) 解析結果を実験結果と比較してみると、半無限一様弾性地盤または成層弾性地盤に直接、建物が埋込まれると仮定することは現実性がなく、基礎底面直下の地盤にゆるみ層を考慮し、基礎側面地盤に人工的な部分を周辺地盤との間に設定する必要性を確認した。
- 2) 解析モデルの精度を向上させるためには、基礎周辺の境界要素分割は解析振動数範囲を考慮して詳細に検討する必要がある、遠方境界についてはその影響度が少く、その差は高振動数域に現れるが僅かであることを、解析モデルの条件を変えた解析結果で判断できた。
- 3) 解析に際して地盤の減衰定数を取り込むことは地盤ばねの虚部の値を、より実験結果に近づけることができた。
- 4) 解析結果のまとめの段階では、基礎底面および側面ばねに分離した値も求めておき4章での略算解により求められる側面ばねとの比較・検討材料とした。

この様にして選定してきた最適設定モデルは、現実の基礎周辺の地盤条件の評価を可能とし、実験結果のシミュレーション解析への適用性を示した。また、他の解析手法との比較では軸対称FEMでの解析結果とほぼ同程度の結果を示した。

第4章 周辺埋土を考慮した建物・地盤の動的相互作用ばねの略算解

この章の前半では、3章で実施した境界要素法の精算解を基本に、同じく境界要素法により、基礎側面の動的地盤ばね（水平・回転成分）を求める略算解のモデル化とその定式化を行った。モデル化に際して留意したことは、精算解の設定条件で主要であった基礎周辺の要素分割を引き継ぎ、表層の埋込まれた部分を取り出し、下方境界を省略しその影響が動的地盤ばねのどの成分に関与するかを検討することとした。

後半の解析作業では、先ず、略算解の解析結果を示した。水平成分のばね特性に関しては側方地盤剛性を反映した妥当な値を示したが、回転成分に関しては以下のような問題点が生じた。表層地盤をパネル状にモデル化したために、面外振動の固有値が主要振動数領域に現れる結果となった。更に、3章で解析した側面ばねとの比較では、剛性の高い下方地盤の影響を持った分離した側面ばねに較べて、下層地盤境界を解放した分だけ小さな値となり、面外振動問題を除けば、従来から適用されている側面ばねの簡略解析手法と同等の結果を得た。

第5章 地盤の動的相互作用ばねの略算解の検証

この章では、3章の分離した基礎側面ばねおよび4章の略算解から求めた基礎側面ばねの、普遍的な適応性を検討するために、他の地盤条件・成層弾性地盤での埋込み問題として検討した。基礎が埋込まれる表層部分は、3、4章の地盤条件と同一で、基礎が支持される地盤は、一般に言われる軟質な砂礫地盤である。解析に際しては、基礎底面の動的地盤ばねには3次元波動論から求める値を、基礎側面の動的地盤ばねには、上記2種類の解析結果を用いた。解析結果の検証の対象として、起振機による振動実験の共振・位相曲線結果と地震観測時の建物周波数応答特性結果を用いた。共振・位相曲線結果に対するシミュレーション解析では、分離型の地盤ばねを用いた結果、共振振動数はわずかに高振動数側に算定したが、最大振幅値は約2倍に算定した。これは、地盤ばねの実部を高めに、虚部を低めに評価したことが理由である。一方、略算解からの側面ばねを用いた結果では、共振振動数を低振動数側へ、最大振幅を低めに算定した。この最大の理由は共振振動数が、地盤ばねの回転成分の面外振動の影響を受けている振動数領域内にあり、特に虚部の結果が顕著で、振幅値を低めに評価している。

地震観測時の建物周波数応答特性に関しては、略算解からの側面ばねを用いた結果の方が、全体的なシミュレーション解析の精度は良く、地盤－建物のもつ卓越振動数付近での適合度はやや悪いものの地震動の特性、表層地盤の特性には対応している。

以上をまとめると、振動実験結果の全振動数域に対して、最適な動的地盤ばねが設定できれば、地震応答解析に関しては、入力地震動の設定に問題を絞り込むことができると考えられる。

第6章 結 論

本研究で得られた結果・知見を要約している。

審 査 結 果 の 要 旨

構造物の耐震設計においては、主体構造の地中埋設による地震力の低減及び構造物の振動エネルギーの地下逸散効果を利用することにより、安全性を向上させることが可能であるが、未だその理論的説明はなされていない。解析法を確立するためには、基礎直下及び周辺地盤の人工的な変化を考慮して動的地盤ばねを評価する必要がある。本論文は、先ずその精算解を求め、調査・実験結果等と比較して妥当性を検証し、更に簡明なモデルを用いた略算解を提案して実用化を計ることを目的としたもので、全編6章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、本論文に関連する既往の研究を分析し、本論文の位置付けを明らかにしている。

第3章では、境界要素法により埋め込まれた建物の動的地盤相互作用ばねの精算解を求め、これを実験結果と比較し、適用性について述べている。すなわち、半無限一様弾性地盤中に埋め込まれた建物の基礎底面に集約した水平、回転並びに水平・回転連成のばねと実験結果から得られた動的地盤ばねとの直接的な対応について記述している。建物を深く埋め込む場合、基礎底面や側面に周辺地盤と異なる剛性の領域が存在するが、それらを解析的に適切に評価できることを示している。また、地盤ばねを基礎底面ばね及び側面ばねに分離した場合の結果も示している。最適設定モデルによる解析結果は、実験結果のシミュレーション解析への適用性並びに現実の基礎周辺地盤の評価の可能性を明らかにしている。

第4章では、第3章で求めた境界要素法による精算解をもとに、周辺埋土を考慮した基礎側面ばねの略算解を求めている。下層地盤を自由境界とする仮定が動的地盤ばねに及ぼす影響を検討している。その結果、水平成分のばね特性は、側方地盤剛性を反映した妥当な数値を示し、回転成分に関しては表層地盤をパネル状にモデル化したため、面外振動の固有モードが主要振動領域に現れる結果となっている。更に、第3章で解析した精算解の側面地盤ばねとの比較では、下層地盤境界を解放したため、下方地盤の影響を含んだ精算解に較べ、剛性が小さくなることを述べている。

第5章では、動的地盤相互作用ばねの略算解の検証を第3章の結果と第4章の結果より行い、更に基礎側面ばねの評価の有用性の検討を行っている。本章では、成層弾性地盤への埋め込み問題を考え、解析に際して基礎底面動的地盤ばねには3次元波動論からの値を、基礎側面動的地盤ばねには上記2種類の解析結果からの値を用いている。解析結果の検証のため、実現象として起振機による振動実験結果及び地震時の建物応答特性の観測結果を用いて比較している。振動実験に関しては、分離型の地盤ばねを用いた精算解では共振振動数はわずかに高振動数側になり、略算解では低振動数側になっている。地震観測時の建物周波数応答特性に関しては、略算解からの側面ばねを用いた場合のシミュレーション解析の精度が良く、地震動及び表層地盤の特性に良く対応している。

第6章は、結論である。

以上要するに本論文は、構造物と地盤の複雑な相互作用を境界要素法による精算解を適用して表現し、また略算解を求めて実用を可能としたもので、今後の耐震工学に寄与する処は少なくない。

よって、本論文は博士（工学）論文として合格と認める。